

Submitted : 12 August 2022

Revised : 18 December 2022

Accepted : 16 May 2023

PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK JENIS POLIETILENA BERDENSITAS TINGGI (HDPE) DAN POLIPROPILENA (PP) DENGAN BENTONIT SEBAGAI KATALIS

Emi Erawati*, Farid Nur Huda

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta,
Sukoharjo, 57169, Indonesia

*Email: emi.erawati@ums.ac.id

Abstrak

Studi ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh persen berat katalis dan berat campuran bahan terhadap yield dan komposisi hasil pirolisis sampah polipropilen (botol air mineral) dan polietilena berdensitas tinggi (tutup botol air mineral). Pirolisis dilakukan dengan variasi jumlah katalis 0, 5, 10, 15, dan 20 %b/b, serta variasi berat campuran bahan 50, 60, 70, 80, dan 90 %b/b. Hasil *yield* cair, padat, dan gas tertinggi pada variasi jumlah katalis secara berurutan adalah 73,26; 26,4; dan 0,34%. Pada variasi berat campuran bahan diperoleh *yield* cair, padat, dan gas tertinggi pada 75,42; 21,6; dan 2,98 %. Hasil analisis *gas chromatography-mass spectrometry* (GCMS) didapatkan %area tertinggi pada senyawa 1,3,5,7 *Cyclooctatetraene* sebesar 71,61%.

Kata Kunci: Bentonit; Polietilena berdensitas tinggi; Polipropilena; Pirolisis; Yield

Abstract

This study aims to study the effect of the weight of the catalyst and the polypropylene (PP - mineral water bottles) & high-density polyethylene (HDPE - mineral water bottle caps) mixture on the yield and composition of the pyrolysis product. Pyrolysis was carried out with the amount of catalyst 0, 5, 10, 15, and 20%w/w, as well as the weight of the mixture of materials 50, 60, 70, 80, and 90%w/w. The highest liquid, solid, and gas yields were 73.26, 26.40, and 0.34% for catalyst amounts at 20%w/w. The highest liquid, solid, and gas yields were 75.42, 21.60, and 2.98% at PP: HDPE weight at 70%. The gas chromatography-mass spectrometry (GCMS) analysis showed that 1,3,5,7 Cyclooctatetraene has the highest %area at 71.61%.

Keywords: Bentonite; High-density polyethylene; Polypropylene; Pyrolysis; Yield

1. PENDAHULUAN

Menurut pedoman IPCC tahun 2006, sampah yang masuk ke tempat pembuangan akhir (TPA) diklasifikasikan menjadi makanan, kayu, sampah kebun dan taman, kertas koran, popok, kain dan produk tekstil, karet dan kulit, plastik, logam, gelas/kaca serta inert. Kesepuluh jenis sampah tersebut diklasifikasikan sebagai sampah padat perkotaan yang dapat diolah dengan metode yaitu *open dumping* (Zulfa et al., 2021), *controlled landfill*, *sanitary landfill* (Khuzzaman et al., 2013; Winahyu et al., 2019), dan *improved sanitary landfill* (Pattiasina et al., 2018). Sampah plastik tidak bisa diolah dengan metode-metode tersebut. Menurut Undang-Undang Nomor 18

tahun 2008 tentang pengelolaan sampah, paradigma pengelolaan sampah yang semula dari kumpul-angkut-buang menjadi pengurangan dari sumber dan daur ulang sumberdaya. Pendekatan *end of pipe* diganti dengan prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) (Nurfaida et al., 2015). Masih banyak kekurangan pada masing-masing metode pengelolaan sampah plastik tersebut, dan perlu adanya alternatif pengelolaan sampah plastik untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak (Iswadi et al., 2017).

Metode yang digunakan dikenal dengan metode pirolisis. Pada proses pirolisis, rantai karbon plastik dipecah menjadi hidrokarbon yang merupakan unsur senyawa dari bahan bakar minyak. Pirolisis

menghasilkan 3 jenis produk, yaitu gas (H_2 , CO , CO_2 , H_2O dan CH_4), cair, dan padat (arang). Proses pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi 2 metode yaitu pirolisis cepat dan lambat. Pirolisis lambat dilakukan pada suhu 150-300°C sedangkan pirolisis cepat dilakukan pada suhu di atas 300°C (Rafi et al., 2019; Al-Salem et al., 2017).

Dampak negatif plastik, misalnya penambahan bifenil poliklorin (PCB) pada pipa PVC akan mengakibatkan kematian pada jaringan dan kanker pada manusia. Keracunan PCB di Jepang dikenal dengan *yusho*, yaitu penyakit yang ditandai dengan gejala pigmentasi kulit, benjolan-benjolan kulit, gangguan perut, serta tangan dan kaki lemas. Selain itu, dapat pula menyebabkan kematian pada bayi dalam kandungan dan melahirkan cacat (Warlani, 2015).

Dampak lain dari sampah plastik adalah jika tidak dikelola dengan baik, sampah plastik akan menumpuk dan dapat mengganggu lingkungan dan ekosistem. Sifatnya yang susah terurai, elastis, dan tidak menyerap air dapat mengganggu resapan air dan sirkulasi udara ke dalam tanah. Sampah plastik juga dapat menyebabkan terjadinya penurunan kualitas lingkungan (Utami & Fitria Ningrum, 2020).

Beberapa plastik yang biasa digunakan sehari-hari adalah polivinil klorida (PVC), polietilena berdensitas tinggi (HDPE), polietilena berdensitas rendah (LDPE), polipropilena (PP), polietilena tereftalat (PET) dan polistirena (PS) (Diharmi et al., 2017; Endang K, Mukhtar G, Abed Nego, 2021). Jenis-jenis sampah plastik yang umum dijumpai antara lain PET yang digunakan sebagai bahan baku botol air mineral. Selain itu, LDPE yang digunakan sebagai bahan baku kantong kresek dan PP yang digunakan sebagai wadah air mineral. HDPE diproduksi dengan kondisi bertekanan rendah antara 5-150 kg/cm² dan temperatur berkisar 60-300°C (Ramadhani & Kholidah, 2019).

Hasil pirolisis berupa arang dapat digunakan sebagai bahan bakar dan bisa juga digunakan sebagai bahan karbon aktif. Zat aditif atau campuran dalam bahan bakar merupakan zat yang dihasilkan oleh minyak. Sedangkan gas yang terbentuk dapat dibakar secara langsung (Mujiarto et al., 2013). Penelitian tentang pirolisis dengan menggunakan beberapa jenis katalis dapat dilihat pada Tabel 1.

Katalis dalam pirolisis plastik berfungsi untuk mereduksi waktu dan suhu reaksi, mengoptimalkan kinetika dan meningkatkan kualitas produk dengan syarat luas permukaan yang besar dan volume pori besar untuk meningkatkan aktivasi katalis (Ramadhani & Kholidah, 2019). Penambahan katalis lempung bentonit sangat direkomendasikan untuk menghasilkan *yield* lebih besar (Kamal, 2022). Bentonit merupakan salah satu jenis tanah liat yang masih banyak tersedia di alam. Katalis yang digunakan dalam proses pirolisis plastik ada 3 yaitu perengkahan fluida, katalis reformasi, dan katalis aktif. Katalis yang digunakan untuk perengkahan berfungsi untuk memecah hidrokarbon kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana contohnya zeolit (Silalahi et al., 2013). Beberapa katalis yang digunakan pada katalis perengkahan biasanya berbentuk padat contohnya

zeolit, alumunium hidrosilikat, lempung bentonit, *fuller earth bauxite*, dan silika-alumina (Askaditya, 2010).

Tabel 1. Penelitian pirolisis dengan beberapa katalis

Bahan Baku	Katalis	Peneliti
PETE	Tanah liat	Kamal, 2022
PS-PP	<i>Zeolite</i>	Berlian et al., 2022
PS	Silika alumina	Zikri et al., 2020
PP-HDPE	Kaolin	Erawati, Hamid, & Febriansyar, 2020
LDPE	Kaolin	Erawati, Hamid, & Martenda, 2020
LDPE	Natural Zeolite	Erawati et al., 2019
Polystyrene	Tanpa katalis	Baena-González et al., 2020
Polyolefin	ZSM and Silicon aluminum	Xu et al., 2021
HDPE	<i>Activated carbon</i>	Lam et al., 2019
HDPE, PET, LDPE, PVC, PS, PP	Alumina Nanoparticles	Sekar et al., 2021
LDPE	<i>Fluid catalytic cracking of hydrocarbons (FCC)</i>	De La Puente et al., 2002
PE and PMMA	Fe-MCM-41	De Stefanis et al., 2007
PP	<i>Carbon black</i>	Gómez-Hernández et al., 2019
PS	Bentonite	Dewangga et al., 2019

Studi ini melakukan pirolisis limbah campuran PP dan HDPE dengan variasi berat katalis bentonit dan variasi campuran bahan dan dilanjutkan dengan proses distilasi yang masih jarang dilakukan.

2. BAHAN DAN METODE

Tutup botol plastik (HDPE) dan gelas plastik air mineral (PP) diperoleh dari pengepul di daerah Gilingan, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia, sedangkan bentonit dibeli dari penjual lokal melalui aplikasi perdagangan elektronik.

2.1 Tahap Persiapan

Bahan dibersihkan dengan menggunakan air mengalir. lalu dikeringkan dengan menggunakan panas matahari selama 1 hari. Bahan baku gelas plastik dipotong dengan ukuran 2×1 cm sedangkan tutup botol plastik dipotong dengan ukuran 2,2×3,2 cm.

2.2 Tahap Pirolisis

Tutup botol plastik dan gelas air mineral sebanyak 250 g dan cup air mineral sebanyak 250 g dimasukkan

ke dalam reaktor berdiameter 20 cm dan tinggi 30 cm. Suhu reaksi berkisar pada 385-430°C. Bagian atas dari reaktor ditutup dengan perpak. Hasil cairan yang keluar dari reaktor didinginkan dengan kondensor dan ditampung dalam penampung minyak. Cairan ditimbang setiap 20 menit selama 100 menit. Gas yang tidak terkondensasi akan masuk ke dalam dua galon 19 liter yang berisi air. Gas yang keluar diukur suhunya dengan termokopel dan tekanannya dengan manometer terbuka. Volume air ditampung dalam gelas ukur. Penelitian diulang untuk variasi massa bahan 60, 70, 80, dan 90 (%b/b) dan variasi katalis tanpa katalis, 5, 10, 15, dan 20 (%b/b).

2.3 Tahap Distilasi

Hasil cairan pirolisis didistilasi batch dengan variasi suhu berturut-turut yaitu 150, 200, dan 300°C. Variasi dilakukan agar mendapat karakter hasil hampir sama dengan gasolin untuk suhu 150-200°C, minyak tanah untuk suhu 200-300°C, dan diesel untuk suhu 300-370°C.

2.4 Tahap Analisis

Produk pirolisis dengan yield terbanyak pada proses distilasi dianalisis komposisi produk hasil distilasi dilakukan dengan menggunakan GCMS-QP2010S SHIMADZU. Fase diam yang digunakan adalah Rtx 5 MS dengan panjang kolom 30 meter dan diameter 0,25 mm untuk fase gerak atau gas pembawa yang digunakan adalah helium. Dalam instrumen MS digunakan metode pengionan elektron impact dengan energi 70 Ev.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Yield Produk

3.1.1 Yield pada proses pirolisis

Berdasarkan Tabel 1, variasi katalis dengan komposisi bahan yang terbaik adalah 20% b/b dengan suhu tercatat berkisar 415°C menghasilkan *yield* cair terbanyak yaitu 73,26%. Pada suhu dan variasi inilah menghasilkan *yield* utama yaitu *yield* cair yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya.

Tabel 1. *Yield* variasi %berat katalis

Variasi katalis	<i>Yield</i> (%)		
	Cair	Padat	Gas
Tanpa Katalis	49,6	16	34,34
5	53,46	20	26,54
10	59,52	23,3	17,18
15	56,70	24,2	19,10
20	73,26	26,4	0,34

Berdasarkan Tabel 2, variasi pada komposisi 70% HDPE mendapatkan *yield* tertinggi sebesar 75,42%. Studi oleh Yuriandala et al. (2016) dengan menggunakan bahan baku PS 40 %b/b dan aluminum foil diperoleh *yield* sebesar 72,96%. Studi oleh Riandis et al. (2021) dengan bahan baku LDPE dan PS diperoleh *yield* cair tertinggi sebesar 65,23%. Hal ini dikarenakan perbandingan bahan yang tepat pada jumlah HDPE

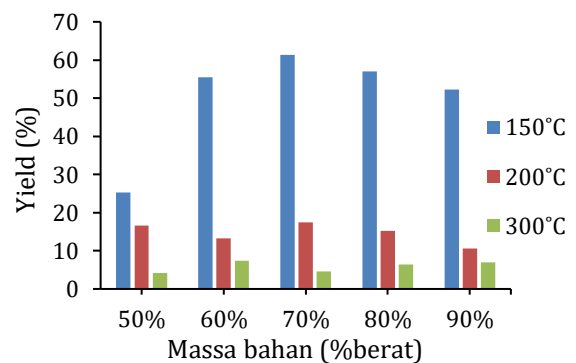
70% sehingga menghasilkan *yield* cair yang lebih tinggi dibanding lainnya. Dengan dibantu katalis berupa bentonit sebesar 20% b/b hal ini akan meningkatkan laju reaksi dan reaksi lebih mudah terjadi karena katalis membantu merengkahkan/depolimerisasi plastik sehingga produk yang dihasilkan bisa optimum (Waluyo et al., 2019).

Tabel 2. *Yield* variasi % berat campuran bahan

Variasi Bahan (%berat)	<i>Yield</i> (%)		
	Cair	Padat	Gas
50	73,26	25,4	1,34
60	72,36	22,4	5,24
70	75,42	21,6	2,98
80	74,16	23	2,84
90	74,7	23,8	1,5

3.1.2 Yield produk proses distilasi

Gambar 1 menunjukkan hasil distilasi dan diperoleh *yield* tertinggi sebesar 55% pada variasi campuran bahan 70% b/b. Selanjutnya hasil ini akan dilakukan uji GC-MS.

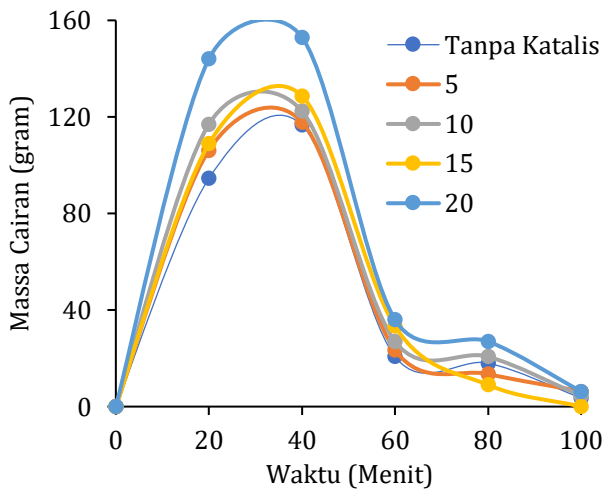


Gambar 1. *Yield* distilasi %massa campuran bahan

3.1.3 Hubungan massa produk cair terhadap waktu

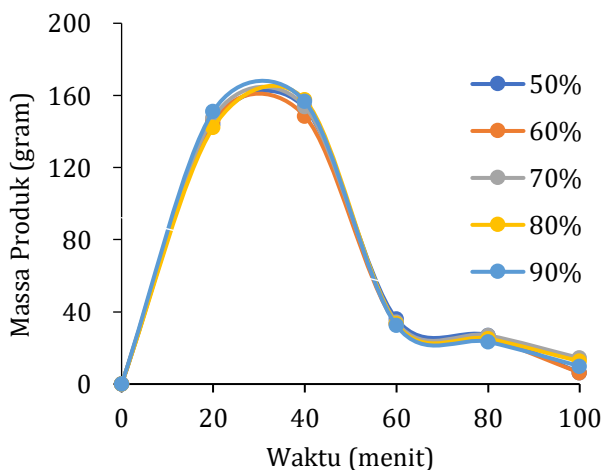
Gambar 2 menunjukkan bahwa massa produk cairan yang paling tinggi didapat pada katalis 20% b/b dengan total massa sebesar 366,3 g dan paling rendah pada variasi tanpa katalis sebesar 253,4 g. Katalis dapat menurunkan waktu reaksi inisiasi dan memperbaiki kuantitas dan kualitas produk keluarannya. Katalis juga dapat mendorong selektifitas produk akhir sesuai dengan yang diinginkan.

Berdasarkan teori Arrhenius, yang menyatakan bahwa katalis dapat mempercepat laju reaksi dengan cara menurunkan energi aktivasi. Hal ini disebabkan karena energi aktivasi berbanding terbalik dengan kecepatan suatu reaksi. Semakin besar kecepatan reaksi maka semakin meningkat pula produk yang dihasilkan.



Gambar 2. Perubahan massa cairan terhadap waktu pada variasi katalis

Gambar 3 menunjukkan produk cairan tertinggi didapat pada variasi %campuran bahan yaitu HDPE 70% dengan hasil massa total cairan sebesar 377,1 g dan untuk hasil total yield cairan yang terendah yaitu pada % berat campuran bahan HDPE 60% yaitu 359,1 g. Proses pirolisis dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya seperti kecepatan pemanas, *cracking*, suhu, penggunaan katalis, jenis plastik, dan waktu tinggal (Damayanti & Lingkungan, 2015). Selain itu ukuran partikel juga akan menentukan pengaruh proses dan hasil. Pada variasi ini yang paling optimal adalah bahan campuran HDPE 70 (%b/b) dan PP 30 (%b/b), karena berat partikel akan menentukan yield yang dihasilkan, semakin banyak jumlah partikel yang ditambahkan dalam proses pirolisis, semakin banyak *yield* bahan bakar cair (tar) dan arang (Hermaw et al., 2019). Proses pirolisis akan menjadi lamban dikarenakan jika semakin besar ukuran partikel maka luas permukaan per satuan berat yang terkena panas semakin kecil.



Gambar 3. Perubahan massa cairan terhadap waktu pada variasi %campuran bahan

3.1.4 Analisis gas chromatography–mass spectrometry

Berdasarkan hasil analisis GC-MS pada Tabel 3, diketahui bahwa 5 puncak senyawa yang terkandung dalam pirolisis plastik HDPE dan PP memiliki area%

terbesar yaitu 71,61% dengan senyawa 1,3,5,7 *Cyclooctatetraene*. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Sekar et al. (2021) dengan bahan baku yang merupakan campuran HDPE, PET, LDPE, PVC, PS, PP diperoleh solar sebagai produk pirolisis. Studi oleh Erawati, Hamid, & Febriansyar, (2020) dengan bahan baku PP dan HDPE diperoleh produk pirolisis berupa C_9H_{18} (2,4-dimethyl-1-heptane). Penelitian oleh Coniwanti et al. (2021) dengan bahan baku HDPE dan PP diperoleh senyawa bensin dan solar. Penelitian yang dilakukan Sarker et al., (2012) dengan campuran HDPE, PP, dan PS menghasilkan senyawa aromatik seperti *ethylbenzene*, *benzene (1-azido-4-methyl-)*, *benzene (cyclopropyl-)*, *benzene (2-propenyl-)*, *benzene (3-methyl-3- butenyl-)*.

Tabel 3. Kandungan hasil pirolisis HDPE dan PP

NO	Area (%)	Komponen	Nama Senyawa
1	71,61	C_8H_8	1,3,5,7 <i>Cyclooctatetraene</i>
2	5,67	C_9H_{10}	<i>Alpha-Methyl styrene</i>
3	5,54	C_7H_8	<i>Toluene</i>
4	5,24	C_8H_{10}	<i>Ethylbenzene</i>
5	3,63	C_8H_{16} , $C_5H_{11}Cl$, C_9H_{18}	4 methyl 1- <i>Heptene</i> , 1-chloro 3- <i>methylbutane</i> , 2,4-Dimethyl 1- <i>Heptene</i>

4. KESIMPULAN

Pirolisis campuran limbah plastik jenis propilena berdensitas tinggi (HDPE) dan polipropilena (PP) pada variasi persen berat katalis diperoleh hasil *yield* cair, padat, dan gas secara berurutan adalah 73,26%, 26,40%, dan 1,34%. Sedangkan pada variasi % massa bahan diperoleh *yield* cair, padat, dan gas secara berurutan adalah 75,42%, 21,60%, dan 2,98%. Pada uji GCMS didapatkan persentase area tertinggi sebesar 71,61% dengan senyawa C_8H_8 atau 1,3,5,7 *Cyclooctatetraene*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah membiayai Penelitian ini melalui Penelitian Individu Dosen tahun 2023/2024.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197(1408), 177–198.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
 Askaditya, G. (2010). Studi eksperimen pirolisis minyak pelumas bekas menggunakan katalis zeolit. In

Universitas Negeri Sebelas Maret.

- Baena-González, J., Santamaria-Echart, A., Aguirre, J. L., & González, S. (2020). Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil. *Waste Management*, 118, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.035>
- Coniwanti, P., Hadijah, F., Bahrin, D., Novriani, L., Justina, G. M. L., & Robinsyah. (2021). Processing Plastic Waste HDPE and PP on Pyrolysis Temperature Using Cu-Al₂O₃ Catalyst Into an Alternative Liquid Fuel . Proceedings of the 4th Forum in Research, Science, and Technology (FIRST-T1-T2-2020), 7, 7–11. <https://doi.org/10.2991/ahe.k.210205.002>
- De La Puente, G., Klocker, C., & Sedran, U. (2002). Conversion of waste plastics into fuels recycling polyethylene in FCC. *Applied Catalysis B: Environmental*, 36(4), 279–285. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(01\)00287-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00287-9)
- De Stefanis, A., Kaciulis, S., & Pandolfi, L. (2007). Preparation and characterization of Fe-MCM-41 catalysts employed in the degradation of plastic materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 99(1–2), 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.08.033>
- Dewangga, P. B., Rochmadi, & Purnomo, C. W. (2019). Pyrolysis of polystyrene plastic waste using bentonite catalyst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 399(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012110>
- Diharmi, A., Fardiaz, D., Andarwulan, N., & Heruwati, E. S. (2017). Chemical and physical characteristics of carrageenan extracted from *Eucheuma spinosum* harvested from three different Indonesian coastal sea regions. *Phycological Research*, 65(3), 256–261. <https://doi.org/10.1111/pre.12178>
- Endang K, Mukhtar G, Abed Nego, F. X. A. S. (2021). Pengolahan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “*, 5(1), 8. <https://doi.org/10.30872/cmg.v5i1.4755>
- Erawati, E., Hamid, & Febriansyar, R. A. (2020). Pyrolysis kinetics of polypropylene and high density polyethylene wastes using kaolin catalyst. *Materials Science Forum*, 998 MSF, 114–119. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.114>
- Erawati, E., Hamid, & Martenda, D. (2020). Kinetic study on the pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE) waste using kaolin as catalyst. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012071>
- Erawati, E., Hamid, & Permatasari, R. D. (2019). Pyrolysis of polypropylene waste with natural zeolite as catalyst. *AIP Conference Proceedings*, 2114(June). <https://doi.org/10.1063/1.5112463>
- Gómez-Hernández, R., Panecatl-Bernal, Y., & Méndez-Rojas, M. Á. (2019). High yield and simple one-step production of carbon black nanoparticles from waste tires. *Heliyon*, 5(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02139>
- Hermaw, D., Hardianto, A., Suwandon, P., & Rahmadiano, F. (2019). Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Energi Aktivasi Pada Tar Limbah Plastik. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 8(3), 185–190.
- Iswadi, D., Nurisa, F., & Liastuti, E. (2017). Pemanfaatan sampah plastik LDPE dan PET menjadi bahan bakar minyak dengan proses pirolisis. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia UNPAM*, 1(2), 1–9. openjournal.unpam.ac.id/index.php/IITK/article/download/718/585
- Kamal, D. M. (2022). Penambahan Katalis Karbon Aktif dan Tanah Liat Bentonit Pada Pirolisis Sampah Plastik Polyethylene Terephthalate (PETE). *JETM: Jurnal Energi Dan Teknologi Manufaktur*, 5(1), 23–28.
- Khuzzaman, U. A., Rahmayanti, H., & Neolaka, A. (2013). Pengelolaan Sampah Dengan Modifikasi Sanitary Landfill. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 11. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v8i1.8131>
- Lam, S. S., Wan Mahari, W. A., Ok, Y. S., Peng, W., Chong, C. T., Ma, N. L., Chase, H. A., Liew, Z., Yusup, S., Kwon, E. E., & Tsang, D. C. W. (2019). Microwave vacuum pyrolysis of waste plastic and used cooking oil for simultaneous waste reduction and sustainable energy conversion: Recovery of cleaner liquid fuel and techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109359>
- Mujiarto, S., Ristianingsih, Y., Amrullah, A., & Khalid, A. (2013). Studi Proses Pirolisis Tandan Kosong Sawit Menjadi Bio Oil Sebagai. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Nurfaida, Mustari, K., & Dariati, T. (2015). Penerapan Prinsip 3R (Reduce, Reuse Dan Recycle) Dalam Pengelolaan Sampah Melalui Pembuatan Pupuk Organik Cair Di Perumahan Kampung Lette Kota Makassar. *Jurnal Dinamika Pengabdian*, 1(1), 24–37. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/jdp/article/download/2187/1207/3936>
- Pattiasina, M. K., Tondobala, L., & Lakat, R. S. M. (2018). Analisis Pemilihan Lokasi Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Berbasis Geography Information System (Gis) Di Kota Tomohon. *Spasial*, 5(3), 449–460.
- Rafi, A., Hartono, P., & Margianto. (2019). Analisis Energi Terbrukan Pada Proses Pirolisis Dengan Memanfaatkan Sampah Plastik. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol 12, No 01 (2019): *Jurnal Teknik Mesin*, 30.
- Ramadhani, Y., & Kholidah, N. (2019). Pengaruh Aktivasi Katalis Zeolit terhadap Hasil Pirolisis Limbah Styrofoam. In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 2(1), 1–11.
- Riandis, J. A., Setyawati, A. R., & Sanjaya, A. S. (2021). Pengolahan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak Plastic Waste Processing Using Pyrolysis Method Into Fuel Oil. *Jurnal Chemurgy*, 05(1), 8–14. <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK>

- Sarker, M., Mamunor Rashid, M., Molla, M., & Sadikur Rahman, M. (2012). Thermal Conversion of Waste Plastics (HDPE, PP and PS) to Produce Mixture of Hydrocarbons. *American Journal of Environmental Engineering*, 2(5), 128–136. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20120205.03>
- Sekar, M., Praveenkumar, T. R., Dhinakaran, V., Gunasekar, P., & Pugazhendhi, A. (2021). Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor. *Journal of Cleaner Production*, 318(August). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128551>
- Silalahi, I. H., Sayekti, E., & Sianipar, A. (2013). Optimasi Reaksi Perengkahan Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Zeolit / Nikel. *JKK*, 2(1), 13–18.
- Utami, M. I., & Fitria Ningrum, D. E. A. (2020). Proses Pengolahan Sampah Plastik di UD Nialdho Plastik Kota Madiun. *Indonesian Journal of Conservation*, 9(2), 89–95. <https://doi.org/10.15294/ijc.v9i2.27347>
- Waluyo, J., Perkasa, A. P., & Ramadhana, D. (2019). Pirolisis Sampah Plastik HDPE sebagai Alternatif Pengganti Kerosin dengan Menggunakan Katalis Zeolit Alam. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 3(1), 33. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v3i1.43101>
- Warlani, L. (n.d.). Pengelolaan Sampah Plastik Untuk Mitigasi Bencana Alam. *Seminar Nasional FST Universitas Terbuka*.
- Winahyu, D., Hartoyo, S., & Syaikat, Y. (2019). Strategi Pengelolaan Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir Bantargebang, Bekasi. *Jurnal Manajemen Pembangunan Daerah*, 5(2), 1–17. https://doi.org/10.29244/jurnal_mpd.v5i2.24626
- Xu, D., Yang, S., Su, Y., Shi, L., Zhang, S., & Xiong, Y. (2021). Drop-in fuel production with plastic waste pyrolysis oil over catalytic separation. *Waste Management*, 121(December). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121440>
- Yuriandala, Y., Syamsiah, S., & Saptoadi, H. (2016). Pirolisis Campuran Sampah Plastik Polistirena Dengan Sampah Plastik Berlapisan Aluminium Foil (Multilayer). *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 8(1), 10–20. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol8.iss1.art2>
- Zikri, A., Febriana, I., Amin, J. M., Pratiwi, A., Pratiwi, M., & Hifal Reyhan, M. (2020). Pengaruh Jumlah Katalis dan Temperatur Pada Proses Pembuatan Bahan Bakar Cair Limbah Styrofoam dengan Metode Catalytic Cracking. *Jurnal Kinetika*, 11(01), 9–17. <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- Zulfa, I., AN, D., & Anita, S. (2021). Strategi pengelolaan tempat pembuangan akhir (tpa) sampah di kecamatan mandau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(2), 234–244. <https://doi.org/10.31258/jil.15.2.p>